

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平9-159526

(43)公開日 平成9年(1997)6月20日

(51)Int.Cl. <sup>8</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 1 J 3/28			G 0 1 J 3/28	
G 0 2 F 1/35	5 0 1		G 0 2 F 1/35	5 0 1
H 0 4 B 10/08			H 0 4 B 9/00	K
10/02				M
10/18				E

審査請求 未請求 請求項の数36 O L (全 20 頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願平7-319410

(22)出願日 平成7年(1995)12月7日

(71)出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号

(72)発明者 木下 進

神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地

富士通株式会社内

(74)代理人 弁理士 松本 昂

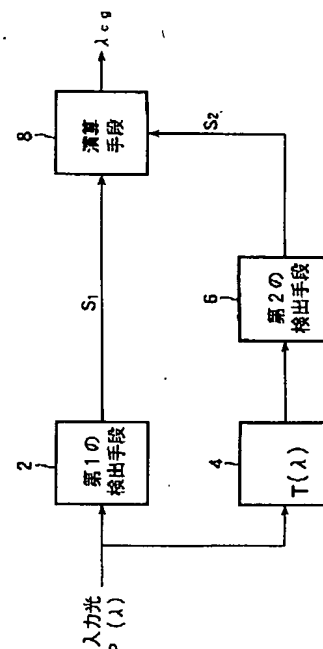
(54)【発明の名称】 重心波長モニタ方法及び装置、光増幅器並びに光通信システム

(57)【要約】

【課題】 本発明は入力光のスペクトルの重心波長のモニタリングに関し、これによりゲインチルトを評価することを課題とする。

【解決手段】 入力光のトータルパワーに対応する第1の値を検出する第1の検出手段2と、波長 $\lambda$ の一次関数で近似される重み付け関数 $T(\lambda)$ により入力及び出力が関係づけられる重み付け手段4と、重み付け手段4から出力される光のパワーに対応する第2の値を検出する第2の検出手段6と、第1及び第2の値に基づき重心波長 $\lambda_{cg}$ を算出する演算手段8とから構成する。

モニタリング装置の基本構成を示す図



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 入力光のスペクトルの重心波長をモニタする装置であって、  
上記入力光のトータルパワーに対応する第 1 の値を検出する第 1 の検出手段と、  
上記入力光の全部又は一部を供給され、その入力及び出力は波長  $\lambda$  の一次関数で近似される重み付け関数  $T$  ( $\lambda$ ) で関係付けられる重み付け手段と、

該重み付け手段から出力される光のパワーに対応する第 2 の値を検出する第 2 の検出手段と、  
上記第 1 及び第 2 の検出手段に動作的に接続され、上記第 1 及び第 2 の値に基づき重心波長  $\lambda_{cg}$  を算出する演算手段とを備えた装置。

【請求項 2】 上記入力光のスペクトルを  $P(\lambda)$  とするとき、上記重心波長  $\lambda_{cg}$  は、式  
$$\lambda_{cg} = \int \lambda P(\lambda) d\lambda / \int P(\lambda) d\lambda$$
  
で定義される請求項 1 に記載の装置。

【請求項 3】 上記演算手段は、上記第 2 の値を上記第 1 の値で除する手段を含む請求項 1 に記載の装置。

【請求項 4】 上記入力光の帯域を制限する光帯域通過フィルタを更に備えた請求項 1 に記載の装置。

【請求項 5】 上記光帯域通過フィルタの通過帯域の最短波長及び最長波長をそれぞれ  $\lambda_1$  及び  $\lambda_2$  とし、上記第 1 及び第 2 の値をそれぞれ  $S_1$  及び  $S_2$  とするとき、上記重み付け関数  $T(\lambda)$  は、 $T(\lambda_1)$  及び  $T(\lambda_2)$  の一方が 0 で且つ他方が 1 になる条件を実質的に満たし、  
上記演算手段は、式

$$\lambda_{cg} = (\lambda_2 - \lambda_1) S_2 / S_1 + \lambda_1$$

により上記重心波長  $\lambda_{cg}$  を算出する請求項 4 に記載の装置。

【請求項 6】 上記入力光を第 1 及び第 2 の分岐光に分岐して出力する分岐手段を更に備え、  
上記第 1 の検出手段は上記第 1 の分岐光を受ける第 1 のフォトディテクタを含み、  
上記重み付け手段には上記第 2 の分岐光が供給される請求項 1 に記載の装置。

【請求項 7】 上記重み付け手段は入力ポート並びに第 1 及び第 2 の出力ポートを有し、  
上記入力ポートには上記入力光の全部又は一部が供給され、上記第 1 及び第 2 の出力ポートはそれぞれ第 1 及び第 2 の分岐光を出力し、  
該第 1 及び第 2 の分岐光の分岐比は、上記重み付け関数  $T(\lambda)$  に従うパラメータ  $a$  を用いて  $a : (1-a)$  で与えられ、  
上記第 2 の検出手段は、上記第 1 及び第 2 の分岐光をそれぞれ受ける第 1 及び第 2 のフォトディテクタと、該第 1 及び第 2 のフォトディテクタのうち出力レベルの大きい方のフォトディテクタを選択する手段とを含み、  
上記第 2 の検出手段は上記選択されたフォトディテクタ

の出力に基づき上記第 2 の値を検出する請求項 1 に記載の装置。

【請求項 8】 上記第 1 の検出手段は、上記第 1 及び第 2 のフォトディテクタの出力を加算する手段を含む請求項 7 に記載の装置。

【請求項 9】 上記重み付け手段は一对の光ファイバを側面融着及び延伸してなるファイバ融着型光カプラを含む請求項 7 に記載の装置。

【請求項 10】 上記重み付け手段は低屈折率層及び高屈折率層を交互に積層してなる多層膜フィルタを含む請求項 7 に記載の装置。

【請求項 11】 上記重み付け手段はファブリ・ペロ光共振器を含む請求項 7 に記載の装置。

【請求項 12】 主光路上に設けられ、該主光路上を伝搬する信号光を受ける光増幅媒体と、  
該光増幅媒体が上記信号光の波長を含む増幅帯域を有するように該光増幅媒体をポンピングするポンピング手段と、  
上記主光路上に設けられ、入力光のスペクトルの重心波長をモニタするモニタリング手段と、  
該モニタされた重心波長に基づき、上記増幅帯域におけるゲイン特性が依存するパラメータを制御する制御手段とを備えた光増幅器。

【請求項 13】 上記光増幅媒体は上記主光路上における上記信号光の伝搬方向のそれぞれ上流側及び下流側に対応する第 1 端及び第 2 端を有し、  
上記ポンピング手段は、ポンプ光を出力するポンプ光源と、上記光増幅媒体の第 1 端及び第 2 端の少なくともいずれか一方に動作的に接続され上記ポンプ光を上記光増幅媒体へ供給する光結合手段とを含む請求項 12 に記載の光増幅器。

【請求項 14】 上記モニタリング手段は上記光増幅媒体の第 2 端に動作的に接続されるモニタ装置を含み、  
該モニタ装置は、  
上記入力光のトータルパワーに対応する第 1 の値を検出する第 1 の検出手段と、  
上記入力光の全部又は一部を供給され、その入力及び出力は波長  $\lambda$  の一次関数で近似される重み付け関数  $T$  ( $\lambda$ ) で関係付けられる重み付け手段と、

該重み付け手段から出力される光のパワーに対応する第 2 の値を検出する第 2 の検出手段と、  
上記第 1 及び第 2 の検出手段に動作的に接続され、上記第 1 及び第 2 の値に基づき重心波長  $\lambda_{cg}$  を算出する演算手段とを備え、  
上記制御手段は、該モニタ装置によりモニタされた重心波長  $\lambda_{cg}$  が予め定められた値になるように上記ポンプ光のパワーを制御する請求項 13 に記載の光増幅器。

【請求項 15】 上記予め定められた値は上記増幅帯域の中心波長である請求項 14 に記載の光増幅器。

【請求項 16】 上記モニタリング手段は、上記光増幅

3

媒体の第 1 端及び第 2 端にそれぞれ動作的に接続される第 1 及び第 2 のモニタ装置を含み、

該第 1 及び第 2 のモニタ装置は、それぞれ、

上記入力光のトータルパワーに対応する第 1 の値を検出する第 1 の検出手段と、

上記入力光の全部又は一部を供給され、その入力及び出力は波長  $\lambda$  の一次関数で近似される重み付け関数  $T$

( $\lambda$ ) で関係付けられる重み付け手段と、

該重み付け手段から出力される光のパワーに対応する第 2 の値を検出する第 2 の検出手段と、

上記第 1 及び第 2 の検出手段に動作的に接続され、上記第 1 及び第 2 の値に基づき重心波長  $\lambda_{cg}$  を算出する演算手段とを備えた請求項 1 3 に記載の光増幅器。

【請求項 1 7】 上記制御手段は、上記第 2 のモニタ装置によりモニタされた重心波長が、上記第 1 のモニタ装置によりモニタされた重心波長に実質的に一致するように、上記ポンプ光のパワーを制御する請求項 1 6 に記載の光増幅器。

【請求項 1 8】 上記制御手段は、上記第 2 のモニタ装置によりモニタされた重心波長が、上記第 1 のモニタ装置によりモニタされた重心波長に所定のオフセットを加えた値に一致するように、上記ポンプ光のパワーを制御する請求項 1 6 に記載の光増幅器。

【請求項 1 9】 上記光増幅媒体は希土類元素がドープされたドープファイバからなる請求項 1 3 に記載の光増幅器。

【請求項 2 0】 請求項 1 3 に記載の光増幅器であって、  
上記主光路上に設けられる減衰率が可変な光アッテネータと、

上記光増幅器から出力される光のパワーが一定になるように上記光アッテネータの減衰率を制御する手段とを更に備えた光増幅器。

【請求項 2 1】 上記光増幅媒体の第 1 端に動作的に接続され、該光増幅媒体内を上記信号光とは逆方向に伝搬する増幅された自然放出光を抽出する手段を更に備え、  
上記モニタリング手段は上記増幅された自然放出光が上記入力光として供給されるモニタ装置を含み、

該モニタ装置は、上記入力光のトータルパワーに対応する第 1 の値を検出する第 1 の検出手段と、上記入力光の全部又は一部を供給され、その入力及び出力は波長  $\lambda$  の一次関数で近似される重み付け関数  $T$  ( $\lambda$ ) で関係付けられる重み付け手段と、該重み付け手段から出力される光のパワーに対応する第 2 の値を検出する第 2 の検出手段と、上記第 1 及び第 2 の検出手段に動作的に接続され、上記第 1 及び第 2 の値に基づき重心波長  $\lambda_{cg}$  を算出する演算手段とを備えた請求項 1 3 に記載の光増幅器。

【請求項 2 2】 上記光増幅媒体は光導波路構造を有し、該光導波路構造からはその側方に向けて自然放出光が漏れ出し、

4

上記モニタリング手段は上記自然放出光が上記入力光として供給されるモニタ装置を含み、

該モニタ装置は、上記入力光のトータルパワーに対応する第 1 の値を検出する第 1 の検出手段と、上記入力光の全部又は一部を供給され、その入力及び出力は波長  $\lambda$  の一次関数で近似される重み付け関数  $T$  ( $\lambda$ ) で関係付けられる重み付け手段と、該重み付け手段から出力される光のパワーに対応する第 2 の値を検出する第 2 の検出手段と、上記第 1 及び第 2 の検出手段に動作的に接続され、上記第 1 及び第 2 の値に基づき重心波長  $\lambda_{cg}$  を算出する演算手段を備えた請求項 1 2 に記載の光増幅器。

【請求項 2 3】 上記主光路上に設けられ、上記信号光が受けた波長分散を相殺するようにその分散値が設定される分散補償ファイバを更に備えた請求項 1 2 に記載の光増幅器。

【請求項 2 4】 上記信号光は波長分割多重された複数の信号光からなる請求項 1 2 に記載の光増幅器。

【請求項 2 5】 上記増幅帯域に含まれる波長を有するダミー光を上記光増幅媒体へ供給するダミー光源を更に備え、

上記パラメータは上記ダミー光のパワーである請求項 1 2 に記載の光増幅器。

【請求項 2 6】 波長分割多重信号光を送出する送信局と、

該波長分割多重信号光を受ける受信局と、

上記送信局及び上記受信局を結ぶ光伝送路と、

該光伝送路の途中に設けられ、該光伝送路に動作的に接続される主光路を有する光中継器とを備え、

該光中継器は、

30 上記主光路上に設けられて上記波長分割多重信号光を受ける光増幅媒体と、

該光増幅媒体が上記信号光の波長を含む増幅帯域を有するように該光増幅媒体をポンピングするポンピング手段と、

上記主光路上に設けられ、入力光のスペクトルの重心波長をモニタするモニタリング手段と、  
該モニタされた重心波長に基づき、上記増幅帯域におけるゲインチャルト特性が依存するパラメータを制御する制御手段とを備えた光通信システム。

40 【請求項 2 7】 上記光中継器が複数ある請求項 2 6 に記載の光通信システム。

【請求項 2 8】 上記複数の光中継器における上記重心波長の目標値は、上記送信局から上記受信局に向かうに従ってシフトしていく請求項 2 7 に記載の光通信システム。

【請求項 2 9】 上記重心波長の目標値のシフトの方向は、上記送信局から上記受信局に向かうに従って減少する方向である請求項 2 8 に記載の光通信システム。

50 【請求項 3 0】 上記各光中継器は、それぞれ、当該モニタされた重心波長を下流の光中継器に通知する手段を

5

更に備えた請求項 27 に記載の光通信システム。

【請求項 31】 上記波長分割多重信号光に関する監視情報を上記光中継器へ送る手段を更に備え、上記制御手段は、上記監視情報及び上記モニタされた重心波長に基づき上記パラメータを制御する請求項 26 に記載の光通信システム。

【請求項 32】 上記監視情報は上記波長分割多重信号光の重心波長を含む請求項 31 に記載の光通信システム。

【請求項 33】 上記監視情報は、上記波長分割多重信号光の各チャネルの波長及び運用されているチャネルを特定するためのデータを含む請求項 31 に記載の光通信システム。

【請求項 34】 上記波長分割多重信号光は、伝送データよりも十分低速なトーン成分で変調されたパイロット光を含み、

上記モニタリング手段は、上記入力光のトータルパワーに対応する第 1 の値を検出する第 1 の検出手段と、

上記入力光を供給され、その入力及び出力は波長  $\lambda$  の一次関数で近似される重み付け関数  $T(\lambda)$  で関係付けられる重み付け手段と、

該重み付け手段から出力される光のパワーに対応する第 2 の値を検出する第 2 の検出手段と、

上記第 1 及び第 2 の検出手段に動作的に接続され、上記第 1 及び第 2 の値に基づき重心波長  $\lambda_{cg}$  を算出する演算手段とを備え、

上記重み付け手段は入力ポート並びに第 1 及び第 2 の出力ポートを有し、

上記入力ポートには上記入力光が供給され、上記第 1 及び第 2 の出力ポートはそれぞれ第 1 及び第 2 の分岐光を出力し、

該第 1 及び第 2 の分岐光の分岐比は、上記重み付け関数  $T(\lambda)$  に従うパラメータ  $a$  を用いて  $a : (1-a)$  で与えられ、

上記光中継器は、上記第 1 及び第 2 の分岐光からそれぞれ得られる上記トーン成分の比が一定になるように上記重み付け手段を制御する手段を更に備えた請求項 26 に記載の光通信システム。

【請求項 35】 上記重み付け手段の温度が制御される請求項 34 に記載の光通信システム。

【請求項 36】 入力光のスペクトルの重心波長をモニタする方法であって、(a) 上記入力光のトータルパワーに対応する第 1 の値を検出するステップと、(b) 波長  $\lambda$  の一次関数で近似される重み付け関数  $T(\lambda)$  により上記入力光の重み付けを行って重み付けされた光を得るステップと、(c) 上記重み付けされた光のパワーに対応する第 2 の値を検出するステップと、(d) 上記第 1 及び第 2 の値に基づいて次式で定義される重心波長  $\lambda_{cg}$  を算出するステップとを備えた方法。

6

$$\lambda_{cg} = \int \lambda P(\lambda) d\lambda / \int P(\lambda) d\lambda$$

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、一般的に、光のスペクトルの測定及びその測定の光増幅及び光通信への適用に関し、更に詳しくは、入力光のスペクトルの重心波長をモニタする方法及び装置並びに該装置を有する光増幅器及び光通信システムに関する。

【0002】近年、光増幅器の光通信システムへの適用に関する研究及び開発が精力的に進められている。例えば、エルビウムドープファイバ光増幅器 (EDFA) を有するブースターアンプ、リピータ及びブリアンプの重要性が明らかになっている。

【0003】

【従来の技術】従来、信号光を受ける光増幅媒体と、光増幅媒体が信号光の波長を含む増幅帯域を有するように光増幅媒体をポンピングする手段とを備えた光増幅器が公知である。

【0004】光増幅媒体が第 1 端及び第 2 端を有するエルビウムドープファイバ (EDF) である場合、ポンピング手段は、適切な波長のポンプ光を出力するポンプ光源と、ポンプ光を第 1 端及び第 2 端の少なくともいずれか一方からドープファイバへ供給する手段とを含む。また、半導体材料からなる光増幅媒体が知られている。この場合、ポンピング手段は、媒体に電流注入する手段を含む。

【0005】一方、伝送容量を飛躍的に増大するために、波長分割多重 (WDM) システムが提案されている。WDM システムは、互いに異なる波長の複数の信号光を波長分割多重してなる WDM 信号光を送り出す送信局と、送り出された WDM 信号光を伝送する光伝送路と、伝送された WDM 信号光を受ける受信局とを備える。WDM システムにおける伝送距離を長くするために、光増幅器を有するリピータが光伝送路の途中に 1 つ又は複数設けられる。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】光増幅器を WDM システムに適用する場合、考慮すべき点は、光増幅器に見られるゲインチルトである。ゲインチルトはゲインの波長依存性に基づくものである。

【0007】例えば EDFA においては、エルビウムドープファイバにおける均一広がり (homogeneous broadening) の特性から、トータル入力パワーの変化によりゲインチルトも変化する。

【0008】従って、WDM システム或いはリピータを設計し或いは運用する場合には、ゲインチルトを把握しておくことが重要である。ゲインチルトを把握するための技術として光スペクトルアナライザを用いるものがある。しかし、光スペクトルアナライザは構成が複雑で高信頼性が要求される全ての光増幅器に光スペクトルアナ

ライザを組み込むことは現実的ではない。

【0009】 本発明の目的は、ゲインチルトの評価に代替可能な新規なモニタリングの方法及び装置を提供することにある。モニタリングの対象として、本発明では、与えられた光のスペクトルの重心波長が提案される。

【0010】 本発明の他の目的は、このモニタリング技術が適用される光増幅器を提供することにある。本発明の更に他の目的は、このモニタリング技術が適用される光通信システムを提供することにある。

【0011】

【課題を解決するための手段】 本発明のある側面によると、入力光のスペクトルの重心波長をモニタする装置が提供される。第1の検出手段は、入力光のトータルパワーに対応する第1の値を検出する。

【0012】 入力光の全部又は一部は重み付け手段へ供給される。重み付け手段の入力及び出力は、波長 $\lambda$ の一次関数で近似される重み付け関数 $T(\lambda)$ で関係付けられる。

【0013】 第2の検出手段は、重み付け手段から出力される光のパワーに対応する第2の値を検出する。演算手段は第1及び第2の検出手段に動作的に接続される。演算手段は、第1及び第2の値に基づき重心波長 $\lambda_{cg}$ を算出する。

【0014】 入力光のスペクトルが $P(\lambda)$ で与えられるときに、重心波長 $\lambda_{cg}$ は、式

$$\lambda_{cg} = \int \lambda P(\lambda) d\lambda / \int P(\lambda) d\lambda$$

で定義することができる。

【0015】 望ましくは、演算手段は、第2の値を第1の値で除する手段を含む。これにより、上述の式に基づいて容易に重心波長 $\lambda_{cg}$ を得ることができる。得られた重心波長によって例えば光増幅器のゲインチルトを評価することができる。

【0016】 本発明は波長による定義によって限定されない。波長の変化は、限られた範囲内では実質的に周波数の変化に比例する。即ち、波長の変化 $\Delta\lambda$ と周波数変化 $\Delta\nu$ の間には次式で表される関係があり、20nm(例えば1.54-1.56 $\mu\text{m}$ )程度の波長帯域では、よい近似で波長変化と周波数変化は比例関係にあると言える。

$$\Delta\lambda = (\lambda^2 / c) \Delta\nu$$

ここで $\lambda$ は該当する波長であり、 $c$ は光速である。本願明細書では、慣習に従って波長による定義を採用しているが、以上のことから、「波長」という語は全て「周波数」に置き換えることができる。

$$T(\lambda) = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \lambda - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \dots (1)$$

【0027】 入力光のスペクトルが存在する帯域が与えられている場合、本発明では重心波長 $\lambda_{cg}$ は次のように

\*【0018】 本発明の他の側面によると、主光路上に設けられ、該主光路上を伝搬する信号光を受ける光増幅媒体と、該光増幅媒体が上記信号光の波長を含む増幅帯域を有するように該光増幅媒体をポンピングするポンピング手段と、上記主光路上に設けられ、上記信号光を含む入力光のスペクトルの重心波長をモニタするモニタリング手段と、該モニタされた重心波長に基づき、上記増幅帯域におけるゲインチルト特性が依存するパラメータを制御する制御手段とを備えた光増幅器が提供される。

10 【0019】 本発明の更に他の側面によると、光通信システムが提供される。送信局は波長分割多重信号光を送出する。受信光は波長分割多重信号光を受ける。送信局及び受信局は光伝送路により結ばれる。光伝送路の途中には光中継器が設けられる。光中継器は、光伝送路に動作的に接続される主光路を有する。

【0020】 光中継器は、本発明による光増幅器を含む。

【0021】

【発明の実施の形態】 以下、本発明の望ましい実施形態を添付図面に沿って詳細に説明する。図1は本発明のモニタリング装置の基本構成を示すブロック図である。このモニタリング装置は、入力光が与えられたときにそのスペクトルの重心波長をモニタする。

【0022】 第1の検出手段2は、入力光のトータルパワーに対応する第1の値 $S_1$ を検出する。重み付け手段4の入力及び出力は、波長 $\lambda$ の一次関数で近似される重み付け関数 $T(\lambda)$ で関係付けられる。重み付け手段4には、入力光の全部又は一部が供給される。

【0023】 第2の検出手段6は、重み付け手段4から出力される光のパワーに対応する第2の値 $S_2$ を検出する。演算手段8は、第1の値 $S_1$ 及び第2の値 $S_2$ を受け、これらの値に基づく演算を行って重心波長 $\lambda_{cg}$ を得る。

【0024】 図2は図1に示される装置における重心波長 $\lambda_{cg}$ のモニタリングの原理説明図である。今、入力光のスペクトルが、与えられた帯域内で $P(\lambda)$ で表されるものとする。 $\lambda_1$ 及び $\lambda_2$ は上記与えられた帯域におけるそれぞれ最短波長及び最長波長であり、 $\lambda_c$ は上記与えられた帯域の中心波長である。

40 【0025】 また、モニタリングの原理の理解を容易にするために、重み付け関数 $T(\lambda)$ は波長 $\lambda$ の一次関数で与えられ、 $T(\lambda_1) = 0$ 、 $T(\lambda_2) = 1$ であるとする。即ち、重み付け関数は次式で与えられる。

【0026】

【数1】

定義される。

50 【0028】

【数2】

$$\lambda_{cg} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda P(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) d\lambda} \quad \dots (2)$$

【0029】幾何学的には、重心波長 $\lambda_{cg}$ は、与えられた帯域においてスペクトル $P(\lambda)$ によって決定される面積を二等分する波長として定義される。図1において 10 検出された第1の値 $S_1$ 及び第2の値 $S_2$ は(3)及び\*

$$S_1 \propto \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) d\lambda \quad \dots (3)$$

$$S_2 \propto \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad \dots (4)$$

【0031】(1)式を(4)式に代入して、(2)式を考慮しながら $S_2/S_1$ を求めると、(5)式が得られる。 ※

$$\frac{S_2}{S_1} \propto \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \lambda_{cg} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad \dots (5)$$

【0033】特に、図1において、入力光の半分が第1の検出手段2へ供給され、残りの半分が重み付け手段4へ供給されており、且つ、重み付け手段4の損失を無視し得る場合、(5)式の左辺及び右辺は等しくなり、こ★

★の場合、重心波長 $\lambda_{cg}$ は次式で与えられる。

【0034】

【数5】

$$\lambda_{cg} = \frac{S_2}{S_1} (\lambda_2 - \lambda_1) + \lambda_1 \quad \dots (6)$$

【0035】このように特定の重み付け関数或いはそれに近似される関数を用いることによって、第2及び第1の値の比 $S_2/S_1$ に基づいて容易に重心波長 $\lambda_{cg}$ を算出することができる。

【0036】尚、図2において破線で示されるのは、 $R(\lambda) = 1 - T(\lambda)$ で定義される他の重み付け関数であり、このような重み付け関数によっても容易に重心波長 $\lambda_{cg}$ を得ることができる。重み付け関数 $T(\lambda)$ 及び $R(\lambda)$ の組み合わせの効果的な使用については後述する。

【0037】図3はEDFAにおけるゲインチルトの一例を説明するための図である。波長1548, 1551, 1554及び1557nmの4チャネルのWDM信号光を同じ入力パワー(-35dBm/ch)で、ポンピングされているEDF(エルビウムドープファイバ)に入力したときの出力光のスペクトルが示されている。縦軸は出力パワー(dBm)であり、横軸は波長(nm)である。Aで示されるスペクトルはポンプ光のパワーが比較的大きいときに対応しており、負のゲインチルト

トが生じている。即ち、ゲインの波長微分は負である( $dG/d\lambda < 0$ )。

【0038】Cで示されるスペクトルはポンプ光のパワーが比較的小さいときに対応しており、正のゲインチルトが得られている( $dG/d\lambda > 0$ )。Bで示されるスペクトルは、ゲインチルトを生じさせないための最適なポンプ光パワーに対応しており、ゲインの波長微分は零である( $dG/d\lambda = 0$ )。

【0039】何れのスペクトルも、ASE光(増幅された自然放出光)のスペクトルに各チャネルの信号光に対応する4つの鋭いスペクトルが重畳された形状を有している。

【0040】ところで、光増幅器においては、ASE光のスペクトルには小信号に対する利得特性が反映される。ここでは、ASE光はSE光(自然放出光)を含むものとする。従って、ある光増幅器が与えられたときに、与えられた帯域内におけるASE光のスペクトルの重心波長をモニタすることによって、ゲインチルトを把握することができる。一方、図3に示されるような、A

SE光のスペクトルにWDM信号光のスペクトルが重畳されたスペクトルについても、その重心波長のモニタリングは光増幅器の特性について有用な情報を与える。具体的には次の通りである。

【0041】図4の(A)を参照すると、与えられた帯域においてASE光のスペクトル $P(\lambda)$ が $P(\lambda) = a\lambda + b$  ( $0 < a$ ) で表される場合における重心波長のモニタリングが示されている。この場合、スペクトルは波長軸に対して右上がりになるので、重心波長 $\lambda_{cg}$ は与えられた帯域の中心波長 $\lambda_c$ よりも大きくなる。

【0042】図4の(B)を参照すると、与えられた帯域内において、ASE光のスペクトル $P(\lambda)$ が、 $P(\lambda) = c\lambda + d$  ( $c < 0$ ) で表されるときに重心波長のモニタリングが示されている。この場合、スペクトルは波長軸に対して右下がりとなるので、重心波長 $\lambda_{cg}$ は中心波長 $\lambda_c$ よりも小さくなる。

【0043】図4の(C)を参照すると、与えられた帯域内においてASE光のスペクトルが平坦である場合における重心波長のモニタリングが示されている。この場合、重心波長 $\lambda_{cg}$ は中心波長 $\lambda_c$ に一致する。

【0044】このように、与えられた帯域におけるスペクトルの傾斜の傾向は重心波長に反映されるので、重心波長のモニタリング値に基づいてポンプ光パワー等のゲイン特性が依存するパラメータを制御することによって、光増幅器の所要の特性を得ることができる。この種の制御の詳細については後述する。

【0045】次に、WDM信号光における各信号光のスペクトルが線スペクトルで近似される場合、各チャンネルの波長は離散的な値をとるので、重心波長 $\lambda_{cg}$ は次のように簡単に求めることができる。

【0046】

【数6】

$$\lambda_{cg} = \frac{\sum \lambda P(\lambda)}{\sum P(\lambda)} \quad \dots (7)$$

【0047】図5の(A)は波長軸上に等間隔で並んだ3チャンネルのWDM信号光の離散スペクトルを示す図である。第1、第2及び第3チャンネルの波長はそれぞれ $\lambda_0$ 、 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 及び $\lambda_0 + 2\Delta\lambda$ であり、スペクトルの大きさ $P(\lambda)$ はそれぞれ $P_0$ 、 $2P_0$ 及び $3P_0$ である。この場合、(7)式に基づいて重心波長 $\lambda_{cg}$ を求めると、 $\lambda_{cg} = \lambda_0 + 4\Delta\lambda/3$ となる。

【0048】図5の(B)を参照すると、第1、第2及び第3チャンネルのスペクトルの大きさ $P(\lambda)$ がそれぞれ $3P_0$ 、 $2P_0$ 及び $P_0$ の場合が示されている。この場合、重心波長 $\lambda_{cg}$ は、 $\lambda_{cg} = \lambda_0 + 2\Delta\lambda/3$ で与えられる。

【0049】図5の(C)を参照すると、各チャンネルのスペクトルの大きさ $P(\lambda)$ が $P_0$ で同じ場合が示されている。この場合、重心波長は第2チャンネルの波長に一

致する。即ち、 $\lambda_{cg} = \lambda_0 + \Delta\lambda$ である。

【0050】このように、離散スペクトルが与えられている場合にも、本発明のモニタリング技術により離散スペクトルの集合における重心波長を容易に求めることができる。これは、離散スペクトルの集合における重心波長は、スペクトル配置及び各スペクトルの大きさによって決定されるからである。

【0051】逆言すれば、各スペクトルの大きさ等が判明している場合、重心波長のモニタリング値に基づいて、欠落しているチャンネル等に関する情報を得られることがわかる。

【0052】図6は本発明のモニタリング装置の第1実施形態を示すブロック図である。この装置は、入力光の帯域を制限する光帯域通過フィルタ10を有している。フィルタ10は、図2に示される波長 $\lambda_1$ 及び $\lambda_2$ にそれぞれ対応する通過帯域の最短波長及び最長波長を有している。

【0053】フィルタ10を通過した光は、光カプラ12により第1及び第2の分岐光に分岐される。第1の分岐光はフォトディテクタ14へ供給され、フォトディテクタ14は第1の値 $S_1$ に対応する電気信号を出力する。

【0054】第2の分岐光は重み付けエレメント16を通過してフォトディテクタ18へ供給される。フォトディテクタ18は第2の値 $S_2$ に対応する電気信号を出力する。重み付けエレメント16の挿入損失を無視し得る場合には、第1及び第2の分岐光のパワーが等しくなるように光カプラ12が設計される。即ち、この場合光カプラ12は3dBカプラである。

【0055】重み付けエレメント16の挿入損失を無視し得ない場合には、その損失を補償するように光カプラ12における分岐比が調整される。また、フォトディテクタ14及び18の受光感度が異なる場合にも、光カプラ12の分岐比の調整によりこれを補償することができる。分岐比の調整によらず、フォトディテクタ14及び18の出力電気信号の個々の調整によってバランスをとってもよい。

【0056】フォトディテクタ14及び18の出力信号は、重心波長の算出や得られた重心波長に基づく制御に供される演算ユニット20へ供給される。演算ユニット20は、フォトディテクタ14及び18の出力信号をアナログ/デジタル変換するためのA/Dコンバータ21及び23を有している。

【0057】演算手段20は、更に、A/Dコンバータ21及び23からのデジタルデータを取り込むためのI/Oポート24と、予め定められたプログラムに従って演算を行うCPU28と、演算のためのプログラムやデータテーブルが記憶されるROM(リードオンリーメモリ)30と、計算結果を一時的に記憶するためのRAM(ランダムアクセスメモリ)32とを有している。

【0058】I/Oポート24、CPU28、ROM30及びRAM32はデータバス34によって相互に接続されている。符号36はI/Oポート24に接続される制御用入力端子を表している。この端子36は、このモニタリング装置が光増幅器における制御に供される場合に、重心波長の目標値や監視情報を取り込むために使用される。

【0059】図7を参照すると、図6の装置の動作を示すフローチャートが示されている。ここでは、重み付けエレメント16が図2に示される重み付け関数 $T(\lambda)$ を実質的に有しているものとする。

【0060】まず、フォトディテクタ14及び18からの信号に基づき、第1の値 $S_1$ と第2の値 $S_2$ とが読み込まれる(ステップ201)。次いで、(6)式に基づいて、重心波長 $\lambda_{cg}$ が算出される。ここで、 $\lambda_1$ 及び $\lambda_2$ は図2に示されており、或いは光帯域通過フィルタ10(図6参照)のカットオフ波長(通過帯域の最短波長及び最長波長)である。

【0061】そしてステップ203では、算出された重心波長 $\lambda_{cg}$ が読み出される。尚、モニタリング値に基づく制御が行われる場合には、ステップ203に代えて制御のフローが行われる。

【0062】図6の装置へ供給される入力光のトータルパワー $P_{tot}$ はフォトディテクタ14の出力信号に対応しているので、第1の値 $S_1$ に基づいてトータルパワー $P_{tot}$ のモニタリング値を読み出すこともできる。

【0063】図8は本発明のモニタリング装置の第2実施形態を示すブロック図である。ここでは、入力ポート38A並びに出力ポート38B及び38Cを有する重み付けエレメント38が用いられている。

【0064】光帯域通過フィルタ10を通過した光は、光カプラ12により第1及び第2の分岐光に分岐される。第1の分岐光は、図6の装置と同様入力光のトータルパワーを検出するためのフォトディテクタ14へ供給される。第2の分岐光は、重み付けエレメント38の入力ポート38Aに供給される。

【0065】重み付けエレメント38は、入力ポート38Aに供給された第2の分岐光を更に第1及び第2の重み付け分岐光に分岐する。第1及び第2の重み付け分岐光の分岐比は、重み付け関数 $T(\lambda)$ に従うパラメータ $a$ を用いて $a:(1-a)$ で与えられる。

【0066】即ち、入力ポート38Aと出力ポート38Bは重み付け関数 $T(\lambda)$ により関係づけられており、一方、入力ポート38Aと出力ポート38Cは $1-T(\lambda)$ ( $=R(\lambda)$ )により関係づけられている。

【0067】第1及び第2の重み付け分岐光はそれぞれフォトディテクタ40及び42へ供給される。フォトディテクタ40及び42の出力信号は、それぞれA/Dコンバータ22及び26を介してI/Oポート24へ供給される。

【0068】演算ユニット20'のハードウェアは図6の第1実施形態とほぼ同様であるのでその説明は省略する。図8の第2実施形態は、演算ユニット20'がフォトディテクタ40及び42のうち出力レベルが大きい方のフォトディテクタを選択する機能を有している点で特徴づけられる。選択されたフォトディテクタ40または42の出力に基づき、第2の値 $S_2$ が求められる。これにより、第2及び第1の値の比 $S_2/S_1$ に基づいて算出される重心波長のモニタリング精度が向上する。

【0069】以下の説明では、フォトディテクタ40及び42のそれぞれの出力レベルが対応する第3の値 $S_3$ と第4の値 $S_4$ とが用いられる。図9は図8の装置の動作を示すフローチャートである。まずステップ301では、フォトディテクタ14、40及び42の出力信号に基づいて、第1の値 $S_1$ と第3の値 $S_3$ と第4の値 $S_4$ とが読み込まれる。

【0070】ステップ302では、値 $S_3$ 及び $S_4$ の大小関係が判断され、値 $S_3$ が値 $S_4$ に等しいかそれよりも大きい場合にはステップ303へ進み、値 $S_3$ が値 $S_4$ よりも小さい場合にはステップ304へ進む。

【0071】ステップ303では、より大きい第3の値 $S_3$ が(6)式の第2の値 $S_2$ として採用され、式 $\lambda_{cg} = (\lambda_2 - \lambda_1) S_3 / S_1 + \lambda_1$ により重心波長 $\lambda_{cg}$ が算出される。

【0072】ステップ304では、より大きい第4の値 $S_4$ (重み付けエレメントの出力ポート38Cに対応)が第2の値 $S_2$ として採用されるので、重み付け関数は $R(\lambda) = 1 - T(\lambda)$ となり、(6)式は変更される。そして、式

$$\lambda_{cg} = (\lambda_1 - \lambda_2) S_4 / S_1 + \lambda_2$$

により重心波長 $\lambda_{cg}$ が算出される。

【0073】続いてステップ305では、ステップ303又は304で算出された重心波長 $\lambda_{cg}$ が読み出される。図10は本発明のモニタリング装置の第3実施形態を示すブロック図である。この装置は、図8の第2実施形態と対比して、光カプラ12及びフォトディテクタ14が省略され、これにより演算ユニット(20'')のA/Dコンバータ21が省略されている点で特徴づけられる。

【0074】光帯域通過フィルタ10の出力光は全て重み付けエレメント38の入力ポート38Aに供給される。そして、演算ユニット20''が第3の値 $S_3$ と第4の値 $S_4$ とに基づき入力光のトータルパワー $P_{tot}$ を求めている。具体的には次の通りである。

【0075】図11は図10の装置の動作を示すフローチャートである。ステップ401では、フォトディテクタ40及び42の出力信号に基づいて、第3の値 $S_3$ と第4の値 $S_4$ とが読み込まれる。

【0076】ステップ402では、値 $S_3$ 及び値 $S_4$ の大小関係が判断され、値 $S_3$ が値 $S_4$ に等しいかそれよ



りも大きい場合にはステップ403へ進む。ステップ403では、値 $S_3$ に値 $S_4$ を加算してこれを第1の値 $S_1$ とし、また、より大きい第3の値 $S_3$ を第2の値 $S_2$ とする。続いてステップ404では、(6)式に基づいて重心波長 $\lambda_{cg}$ が算出される。

【0077】ステップ402で第3の値 $S_3$ が第4の値 $S_4$ よりも小さいと判断された場合にはステップ405へ進む。ステップ405では値 $S_3$ に $S_4$ を加算してこれを第1の値 $S_1$ とし、また、より大きい第4の値 $S_4$ を第2の値 $S_2$ とする。

【0078】続いてステップ406では、重み付け関数 $R(\lambda)$ に従って、式

$$\lambda_{cg} = (\lambda_1 - \lambda_2) S_2 / S_1 + \lambda_2$$

により重心波長 $\lambda_{cg}$ が算出される。

【0079】ステップ404または406で求められた重心波長 $\lambda_{cg}$ はステップ407で読み出される。このように本実施形態によると、モニタリング精度が高く且つ簡単な構成のモニタリング装置の提供が可能になる。

【0080】次に、図6の重み付けエレメント16並びに図8及び図10の重み付けエレメント38として用いることができる光コンポーネントの具体例を説明する。エレメント16の機能はエレメント38の機能に包含されるので、エレメント38の機能に基づいて具体例を説明する。

【0081】図12は重み付けエレメントの第1実施形態を示す図である。この重み付けエレメントは、透明基板44と、透明基板44上に形成された誘電体多層膜46とを有している。多層膜46は低屈折率層及び高屈折率層を交互に積層して作製される。

【0082】低屈折率層及び高屈折率層は例えばそれぞれ $\text{SiO}_2$ 及び $\text{TiO}_2$ からなる。入力ポート38Aからの光は予め定められた入射角で多層膜46へ入射する。透過光路は出力ポート38Bに対応し、反射光路は出力ポート38Cに対応する。

【0083】図13は図12の重み付けエレメントの特性の一例を示すグラフである。実線で示されるのは透過率の波長特性であり、破線で示されるのは反射率の波長特性である。

【0084】ある特定の波長が与えられると、その波長における透過率及び反射率の和は、原理的には100%となる。図13から明らかなように、比較的リニアリティーが確保されているクロスポイントの近傍で重み付け関数を定義することによって、重心波長を求めることができる。

【0085】これまでに説明したモニタリングの原理においては、与えられた帯域の最短波長及び最長波長のいずれかにおいて重み付け関数の値が0であり且つ他方において1であるとしたが、これは重心波長の算出の理解を簡単にするための配慮である。従って、このような条件が必ずしも満たされない図13のような特性を用いた

場合であっても、(6)式を改良することにより重心波長を求めることができる。

【0086】あるいは、フォトディテクタにより変換された電気信号を処理する回路において、オフセット及び/またはゲインを調整することにより、等価的に、最短波長及び最長波長の何れかにおいて0であり且つ他方において1である重み付け関数を得ることができる。

【0087】図14は重み付けエレメントの第2実施形態を示す図である。このエレメントは、第1のファイバ48と第2のファイバ50とを側面融着し、融着部分を延伸することによって作製される。符号52は融着/延伸部を示している。

【0088】第1のファイバ48の両端がそれぞれ入力ポート38A及び出力ポート38Cに対応し、第2のファイバ50の出力ポート38Cの一端が出力ポート38Bに対応している。第2のファイバ50の他端は、不要な反射が生じないように無反射終端とされる。融着/延伸部52においては、各ファイバのコアが極めて接近し且つ各コアの径が光パワーを閉じ込めておくには不十分な程度に小さくなっているのでエバネッセント波結合が生じ、これにより第1のファイバ48を伝搬する光パワーは第2のファイバ50へカップリングする。そしてそのカップリング比は、融着/延伸部52の形状パラメータの適切な設定によって波長依存性を有するようになる。

【0089】図15は図14の重み付けエレメントの特性の一例を示すグラフである。実線で示されているのは、出力ポート38Bから出力される光のパワーの入力ポート38Aへ入力する光のパワーに対する比(カップリング比)の波長特性を示している。カップリング比が波長の増大に従って正弦波的に変化していることがわかる。

【0090】破線で示されるのは、ポート38Cから出力される光のパワーのポート38Aへ供給される光のパワーに対する比の波長特性を示している。特定の与えられた波長においては、両比の和は原理的には100%である。

【0091】従って、このようなファイバ融着型光カップラを用いることによっても、容易に重心波長を得ることができる。望ましくは、図15における特性曲線のクロスポイントを与える波長が図2の中心波長 $\lambda_c$ に対応するように融着/延伸部52の形状パラメータが設定される。

【0092】重み付けエレメントとしてファブリ・ペロ光共振器を用いることもできる。ファブリ・ペロエタロンの厚み及び両端面反射率を適切に設定することにより、図13の特性に似た特性を得ることができるので、良好なリニアリティーを与える領域において重み付けを行うのである。

【0093】図16は本発明の光増幅器の基本構成を示

す図である。この光増幅器は、増幅すべき信号光が入力される入力ポート 54 と、増幅された信号光が出力される出力ポート 56 とを有している。入力ポート 54 と出力ポート 56 の間には主光路が設定されている。

【0094】主光路上には、信号光を受ける光増幅媒体 58 が設けられる。ポンピング手段 60 は、光増幅媒体 58 が信号光の波長を含む増幅帯域を有するように光増幅媒体 58 をポンピングする。

【0095】主光路上にはまたモニタリング手段 62 が設けられており、モニタリング手段 62 は例えば信号光を含む入力光のスペクトルの重心波長をモニタする。制御手段 64 はモニタされた重心波長に基づき、光増幅媒体 58 の増幅帯域におけるゲインチルト特性が依存するパラメータを制御する。

【0096】光増幅媒体 58 としては、EDF 等の希土類元素がドープされたドープファイバを用いることができる。ドープファイバの代表的な母材材質はシリカやフッ化物である。また、半導体材料からなる光増幅媒体 58 を用いることもできる（半導体光増幅器）。この場合、ポンピング手段 60 は、媒体へ電流を注入する手段を含む。具体的には、半導体光増幅器の電極対にポンピング電圧が印加される。

【0097】光増幅媒体 58 は、主光路上における信号光の伝搬方向のそれぞれ上流側及び下流側に対応する第 1 端及び第 2 端を有している。ドープファイバに適したポンピング手段 60 は、ポンプ光を出力するポンプ光源と、光増幅媒体 58 の第 1 端及び第 2 端の少なくともいずれか一方に動作的に接続されポンプ光を光増幅媒体 58 へ供給する光結合手段とを含む。

【0098】本明細書において、光学部品同士が動作的に接続されるというのは、ファイバ接続或いはコリメートビームを用いた空間接続により直接接続される場合を含み、更に光フィルタ等の他の光学部品を介して接続される場合を含む。

【0099】このようにポンピング手段がポンプ光源を含む場合には、制御手段 64 の制御対象となるパラメータとしては、ポンプ光パワーを採用することができる。この場合、出力ポート 56 から出力される信号光のパワーを一定にするための ALC（自動レベルコントロール）のフィードバックループにポンプ光源を含ませることができないので、ALCを行うためには、減衰率可変の光アッテネータを含むフィードバックループを構成するとよい。

【0100】増幅帯域に含まれる波長を有するダミー光を光増幅媒体 58 へ供給するダミー光源 66 をこの光増幅器が有している場合には、制御手段 64 の制御対象となるパラメータはダミー光のパワーであってもよい。この場合、ポンプ光源を ALC のためのフィードバックループに含ませることができる。

【0101】この光増幅器を WDM システムに適用する

場合には、WDM 信号光が入力ポート 54 へ供給される。この光増幅器においては、モニタされた重心波長に基づいて光増幅媒体 58 の増幅帯域におけるゲインチルト特性を把握して、それに基づく制御を行っているの、所要の特性を得ることができる。

【0102】図 17 は本発明の光増幅器の第 1 実施形態を示すブロック図である。入力ポート 54 と出力ポート 56 の間の主光路上には、光カプラ 68、光アイソレータ 70、EDF 72、WDM カプラ 74、光アイソレータ 76、光帯域通過フィルタ 78、光カプラ 80 及び光アッテネータ 82 が信号光伝搬方向に向かってこの順に設けられている。

【0103】入力ポート 54 へ供給された信号光は、光カプラ 68 により 2 分岐され、その一方は光アイソレータ 70 を通って EDF 72 の第 1 端へ供給される。光カプラ 68 で分岐された他方の光は、信号光の波長が含まれる通過帯域を有する光帯域通過フィルタ 84 を通ってフォトディテクタ 86 へ供給される。フォトディテクタ 86 は後述する監視情報をモニタするためのものである。

【0104】フォトディテクタ 86 の出力信号は、復調器 88 へ供給され、その出力信号は、A/D コンバータ 90 によりデジタル信号に変換されて I/O ポート 24 へ供給される。

【0105】ポンプ光源としてのレーザダイオード 92 からのポンプ光は、WDM カプラ 74 を介して EDF 72 の第 2 端へ供給される。レーザダイオード 92 は駆動回路 94 により駆動される。

【0106】EDF 72 内において増幅された光は、WDM カプラ 74 及び光アイソレータ 76 をこの順に通って光帯域通過フィルタ 78 へ供給される。光帯域通過フィルタ 78 は、信号光の波長が含まれる通過帯域を有している。特にこの光増幅器が WDM システムに適応される場合には、通過帯域の最短波長は最短波長チャネルよりも僅かに短く設定され、通過帯域の最長波長は最長波長チャネルよりも僅かに長く設定される。

【0107】WDM における最短波長チャネル及び最長波長チャネルにより信号帯域が定義される。信号帯域は光増幅媒体の増幅帯域に含まれるので、以下の説明では信号帯域が増幅帯域を意味することもある。

【0108】光帯域通過フィルタ 78 から出力された光は、光カプラ 80 で 2 分岐され、その一方は減衰率が可変な光アッテネータ 82 を通って出力ポート 56 に到達する。

【0109】光カプラ 80 で分岐された他方の光は、本発明の重心波長モニタリング装置へ供給される。ここでは、図 10 のモニタリング装置のハードウェアが採用されている。但し、重み付けエレメント 38 への入力光は光帯域通過フィルタ 78 を通ってきているので、図 10 の光フィルタ 10 は省略されている。

【0110】この実施形態では、モニタされた重心波長が予め定められた値になるようにポンプ光のパワーが制御される。望ましくは、重心波長の目標値は、光帯域通過フィルタ 78 の通過帯域の中心波長、即ち信号帯域の中心波長である。

【0111】ポンプ光のパワーの制御を具体的に説明する。重心波長が中心波長よりも長い場合には、右上がりのゲインチルト（図 3 参照）が生じていると判断し、これを補正するためにポンプ光のパワーを増大させる。一方、重心波長が中心波長よりも短い場合には、右下がりのゲインチルトが生じていると判断し、ポンプ光のパワーを減少させる。このようなポンプ光のパワーの制御によって、重心波長を中心波長に一致させることができ、ゲインチルトを抑制することができる。

【0112】重み付けエレメント 38 へ供給される光は、ASE 成分と信号光成分とからなる。従って、この合成により、重心波長が中心波長に一致していることとゲインチルトがないことが正確に対応しない場合には、中心波長に正または負のオフセット波長を加えた値を目標値としてもよい。

【0113】また、図 5 の (A) 或いは図 5 の (B) に示されるように WDM 信号光が分布している場合にも、これを補正するために、オフセットされた目標値は有効である。

【0114】光アッテネータ 82 は、出力ポート 56 から出力される光のパワーが一定になるようにフィードバック制御される。即ち、フォトディテクタ 40 及び 42 の出力信号に基づいて算出されるトータルパワーと減衰率とを関係づけるテーブルを ROM 30 に記憶させておき、予め定められたプログラムに基づいて光アッテネータ 82 の減衰率が制御されるのである。

【0115】勿論、光アッテネータ 82 の出力光パワーをモニタする手段を設け、そのモニター値が一定になるように減衰率をフィードバック制御してもよい。このようなフィードバックループによる ALC の実施形態については後述する。

【0116】図 18 は本発明の光増幅器が適用される光通信システムのブロック図である。送信局 96 は WDM 信号光を送出する。受信局 98 は WDM 信号光を受け取る。送信局 96 及び受信局 98 は光伝送路 100 により結ばれている。光伝送路 100 の途中には、複数の光中継器 102（#1, #2, ..., #N）が設けられている。ここで N は全光中継器の数である。

【0117】光中継器 102（#1, #2, ..., #N）は、それぞれ、光伝送路 100 に動作的に接続される主光路を有しており、各主光路には本発明の光増幅器が設けられている。例えば図 17 の光増幅器が採用可能である。

【0118】一般に光増幅器においては、光増幅媒体において生じる ASE 光のパワーは波長依存性を有してい

る。従って、図 18 の光通信システムにおいては、送信局 96 から受信局 98 に向かうに従って光中継器 102（#1, #2, ..., #N）における各重心波長の目標値をシフトさせていくのが望ましい。これを具体的に説明する。

【0119】図 19 によりプリエンファシスの概念が説明される。図 19 においては、4 つのチャネルは短波長側から長波長側に向かって #1, #2, #3 及び #4 で表されている。EDFA においては、短波長になるのに従って ASE 光のパワーが大きくなるので、短波長側のチャネルにおいて所要の SNR（信号対雑音比）を確保するために、短波長側のチャネルの信号光出力が比較的大きく設定されることが望ましい。なぜならば、各チャネルの信号光の SNR は、光中継器の段数が増えるに従って劣化し、その劣化の度合いは短波長側のチャネルの方が長波長側のチャネルよりも大きいからである。

【0120】今、最短波長  $\lambda_1$  及び最長波長  $\lambda_2$  によって与えられる信号帯域内に 4 チャネルの信号光を波長分割多重してなる WDM 信号光を想定すると、送信局 96 における重心波長は帯域の中心波長  $\lambda_0$ 。よりも僅かに短い波長  $\lambda_0$  に設定されるのである。これが送信局 96 におけるプリエンファシスである。

【0121】この場合、各光増幅器 104 の重心波長をプリエンファシスされた重心波長  $\lambda_0$  に制御することによって、短波長側チャネルの所要の SNR を確保することができる。

【0122】送信局 96 においてプリエンファシスがなされていない場合には、光中継器の段数が増えるに従って、重心波長の目標値を短波長側にシフトさせるとよい。一区間における重心波長の目標値のシフト量を  $\Delta\lambda$  とすると、光中継器 102（#1, #2, ..., #N）における重心波長の目標値は、それぞれ、 $(\lambda_0 - \Delta\lambda)$ ,  $(\lambda_0 - 2\Delta\lambda)$ , ...,  $(\lambda_0 - N\Delta\lambda)$  で与えられる。

【0123】ここでは  $\lambda_0$  は送信局 96 における重心波長の目標値という意味でのみ用いられており、中心波長  $\lambda_0$ 。よりも短いことに限定されない。例えば、目標波長  $\lambda_0$  を中心波長  $\lambda_0$ 。に一致させてもよい。

【0124】このような重心波長の目標値のシフトにより、短波長側のチャネルにおいて所要の SNR を得ることができる。勿論このようなシフトを送信局 96 におけるプリエンファシスと併用してもよい。

【0125】図 18 の光通信システムは、望ましくは、WDM 信号光に関する監視情報を光中継へ送る手段を更に備えている。監視情報は、例えば、送信局 96 から光伝送路 100 を介して各光中継器 102（#1, #2, ..., #N）へ送られる。

【0126】これによると各光中継器 102（#1, #2, ..., #N）においては、受けた監視情報及びモニタされた重心波長に基づき所望の特性が得られるよう

な制御を行うことができる。

【0127】例えば監視情報がWDM信号光の重心波長或いはその目標値を含む場合、各光中継器においてそれぞれ所望のゲインチルト特性が得られるような制御を行うことができる。

【0128】監視情報がWDM信号光の各チャネルの波長及び運用されているチャネルを特定するためのデータを含む場合、前述した原理に従って各光中継器において容易に重心波長の目標値を算出することができる。

【0129】図20を参照すると、このような監視情報を伝送するための方法が示されている。WDM信号光の1つに伝送データよりも十分低速なトーン成分108を重畳する。そしてこのトーン成分をサブキャリアとして監視情報に基づいた変調を行うのである。トーン成分の周波数は、各周波数成分が光増幅器で減衰しないように、例えば1kHz乃至1MHzに設定される。

【0130】トーン成分により監視情報を伝送するのではなく、特定チャネルの信号光を伝送データでは変調せず、この信号光により監視情報を伝送するようにしてもよい。監視情報の再生は例えば次のようにしてなされる。

【0131】図17において、分岐されたWDM信号光は、光帯域通過フィルタ84で信号帯域が抽出された後にフォトディテクタ86により電気信号に変換され、その電気信号は復調器88へ供給される。復調器88はトーン成分を抽出する帯域通過フィルタと抽出されたトーン成分に基づき監視情報を復調する手段とを含む。

【0132】これにより、例え全チャネルのWDM信号光がフォトディテクタ86に供給されたとしても、監視情報の再生が可能になるのである。得られた監視情報はA/Dコンバータ90を介してI/Oポート24へ供給される。

【0133】図21は本発明の光通信システムを適用可能な他の光通信システムのブロック図である。このシステムでは、信号光の波長とは異なる波長 $\lambda_{sv}$ を有する監視光を用いて、監視情報を伝送している。光伝送路100の途中には複数の光中継器102が設けられている。

【0134】各光中継器102は、監視光を受けて監視情報を再生するために、本発明が適用される光増幅器104の他に監視装置110を有している。光増幅器104の上流側でWDMカブラ112により分岐された監視光は、監視装置110へ供給される。

【0135】監視装置110は、監視光に基づいて復調した監視情報を光増幅器104へ送り、場合によっては光増幅器104からの監視情報の付加情報を受ける。監視情報の復調を行うために、監視装置110は光/電気変換器を有している。また、監視装置110は、復調により得られた監視情報或いは付加情報を付加した監視情報を後段へ送るために、電気/光変換器を有している。

【0136】電気/光変換器からの新たな監視光は、光

増幅器104の下流側でWDMカブラ114によりWDM信号光に合流される。このシステムによると、各光中継器102においてモニタされた重心波長を下流側の光中継器または受信局98に通知することができる。これにより、ある光中継器における重心波長が故障等の原因により変化したときに、当該光中継器を特定することができるようになる。

【0137】図21のシステムに双方向通信を適用して、監視光が受信局98から送信局96へ送られるようにしてもよい。図22は本発明の光増幅器の第2実施形態を示すブロック図である。この光増幅器は、EDF72の第1端及び第2端にそれぞれ動作的に接続されるモニタユニット116及び118を有している点で特徴づけられる。

【0138】モニタユニット116には光カブラ68で分岐された光が入力され、モニタユニット118には光カブラ80で分岐された光が入力される。モニタユニット118は、入力光のスペクトルの重心波長をモニタするために、図17におけるのと同様に重み付けエレメント38並びにフォトディテクタ40及び42を有している。

【0139】モニタユニット116は、ユニット118の構成に加えて入力光の帯域を制限するための光帯域通過フィルタ10を有している。このように2つのモニタユニットを用いることによって、入力ポート54に入力される光に対応するスペクトルの第1の重心波長と、出力ポート56から出力される光に対応するスペクトルの第2の重心波長とをそれぞれモニタすることができる。

【0140】望ましくは、第1の重心波長が第2の重心波長に実質的に一致するように、レーザダイオード92から出力されるポンプ光のパワーが制御される。前述したようなプリエンファシスに基づく重心波長のシフトを行う場合には、第1の重心波長が第2の重心波長に所定のオフセットを加えた値に一致するように、ポンプ光のパワーが制御される。

【0141】ところで、重み付けエレメント38における重み付け関数は環境温度に対して敏感であることが多い。例えば、図12の誘電体多層膜46や図14の融着/延伸部52の温度が変化すると、重み付け関数は波長軸方向にシフトする。よって、重心波長のモニタリング精度を向上するためには、重み付け関数のシフトが生じないように重み付けエレメント38の温度を制御することが望ましい。

【0142】このような温度制御に関して、図22のモニタユニット116について説明する。モニタユニット116の重み付けエレメント38には、温度コントローラ120が付加的に設けられている。その制御の様子は次の通りである。

【0143】WDM信号光の1つをパイロット光とし、その波長を厳密に制御しておく。このようなパイロット

光が与えられると、パイロット光は線スペクトル或いは極めて狭い帯域の急峻なスペクトルを有しているので、重み付けエレメント38からフォトディテクタ40へ供給されるパイロット光のパワーは、例えば図2における重み付け関数 $T(\lambda)$ 及びパイロット光の波長により決定され、重み付けエレメント38からフォトディテクタ42へ供給されるパイロット光のパワーは、重み付け関数 $R(\lambda)$ 及びパイロット光の波長により決定される。もし、これらのパワーの比が一定に保たれているとすれば、重み付け関数も一定に保たれることになり、重み付け関数のシフトが防止されるのである。

【0144】このようなパワーの比は、図20により説明したトーン成分を用いて検出することができる。即ち、パイロット光を一定振幅のトーン成分で変調しておくのである。そして、重み付けエレメント38の2つの分岐出力光からそれぞれ得られるトーン成分の振幅の比を求めれば、それが前述のパワーの比に対応するのである。

【0145】そのために、図22の実施形態では、フォトディテクタ40及び42の出力信号をそれぞれ帯域通過フィルタ122及び126へ供給している。フィルタ122及び126はトーン成分の周波数を含む通過帯域を有している。

【0146】フィルタ122及び126をそれぞれ通過したトーン成分は、A/Dコンバータ124及び128を介してI/Oポート24に取り込まれる。そして、フォトディテクタ40及び42に基づいてそれぞれ得られるトーン成分の比が一定になるように、重み付けエレメント38の温度が制御される。

【0147】図示はしないが、モニタユニット118においても同様に重み付けエレメント38の温度が制御されている。ここでは、パイロット光の波長が絶対波長に安定化されていることを前提に重み付けエレメントの温度制御を説明したが、この温度制御技術は、絶対波長の安定化がなされていないWDMシステムにも適用可能である。

【0148】例えば、各信号光の波長間隔のみが制御される場合がある。即ち、WDM信号光の相対的な波長安定化である。この場合にも上述の温度制御によって、重み付け関数のシフトによる不都合がなくなる。

【0149】図23は本発明の光増幅器の第3実施形態を示すブロック図である。入力ポート54と出力ポート56の間に設定される主光路上には、それぞれ図16に示される基本構成を有する第1の光増幅器130と第2の光増幅器132とが信号光伝搬方向にこの順に設けられている。

【0150】第1の光増幅器130で増幅された光は、減衰率が可変な光アッテネータ134により減衰させられて分散補償ファイバ(DCF)136により第2の光増幅器132へ送られる。

【0151】分散補償ファイバ136は、伝送路において信号光が受けた色分散(波長分散)を相殺するような分散値を有している。この実施形態において光増幅器を2段構成にしている第1の理由は、一般にDCFの損失は大きく、DCF136の上流側において信号光のレベルをある程度まで引き上げておく必要があるからである。

【0152】第2の理由は、DCF136の上流側における光増幅の利得をあまり大きくし過ぎて各信号光のパワーが大きくなると、DCF136において非線形効果が生じ易くなるところにある。

【0153】WDMが適用されているシステムにおいて、DCF136で非線形効果の1つである4光波混合(FWM)が生じると、チャンネル間クロストークが悪くなる。また、自己位相変調(SPM)も信号品質の劣化を招く。

【0154】光増幅器130及び132においては、モニタされた重心波長に基づいてポンプ光のパワーが制御されている。そこで、ALCを行うために、第2の光増幅器132のモニタリング手段62においてモニタされるトータルパワーが一定になるように光アッテネータ134における減衰率がフィードバック制御される。

【0155】光増幅器130及び132における重心波長の制御は例えば次の通りである。前段の光増幅器130の重心波長は中心波長 $\lambda_c$ よりも短くなるように制御され、これにより左上がりのゲインチルトが得られるようにする。

【0156】後段の光増幅器132の重心波長は中心波長 $\lambda_c$ よりも長くなるように制御され、これにより右上がりのゲインチルトが得られるようにする。そして、両光増幅器130及び132のトータルのゲインチルトが平坦になるようにされる。このような重心波長の制御によって、光増幅器の低雑音化及び高効率化が可能になる。

【0157】ところで、図16の本発明の光増幅器の基本構成を示す図においては、モニタリング手段62は光増幅媒体58の信号光伝搬方向下流側に位置するように示されているが、本発明はこれに限定されない。

【0158】例えばモニタリング手段62は光増幅媒体58の上流側、即ち入力ポート54と光増幅媒体58の間に設けられていてもよい。この場合、モニタリング手段62は、図22のモニタユニット116のように入力光の重心波長をモニタリングする他、バックワードASE光の重心波長をモニタリングすることもできる。

【0159】光増幅媒体58においては、信号光と同じ方向に伝搬するフォワードASE光の他、信号光と逆向きに伝搬するバックワードASE光が発生する。従って、このバックワードASE光を主光路から抽出する手段を付加することによって、上述のようなモニタリングが可能になるのである。抽出する手段としては、例えば

図22のEDF72の上流側に設けられる光カプラ68を用いることができる。この場合、バックワードASE光の伝搬の邪魔になる光アイソレータ70は入力ポート54と光カプラ68との間に移され、光カプラ68の1つ残っているポートからバックワードASE光が抽出される。

【0160】抽出されたバックワードASE光は、モニタユニット116と同じように構成されるモニタリング手段に供給される。また、図16において、モニタリング手段62は、光増幅媒体58に沿って設けられていてもよい。光増幅媒体58がEDFのように光導波路構造を有している場合には、自然放出光(SE光)が光増幅媒体58の側方に漏れ出す。従って、この漏れ出したSE光の重心波長をモニタリング手段62がモニタリングするのである。具体的には、次の通りである。

【0161】図24は本発明の光増幅器の第4実施形態を示す主要部のブロック図である。光増幅媒体としてEDF72が用いられており、これをポンピングする手段の図示は省略されている。

【0162】EDF72は外部から光が入らないように構成される積分球等のケース138に收容されている。EDF72の被覆は部分的に除去されており、そこからSE光が側方に漏れ出す。

【0163】SE光は光バンドパスフィルタ140に供給される。フィルタ140の通過帯域は例えば信号帯域に設定される。フィルタ140を通過したSE光の一部は、重み付けエレメント142(例えば図12の誘電体多層膜46)を通過してフォトディテクタ144に入射する。フィルタ140を通過したSE光の残りはフォトディテクタ146に入射する。

【0164】フォトディテクタ144及び146がフォトダイオードを含む場合、その出力信号は電流信号として与えられるので、電流/電圧(I/V)変換される。フォトディテクタ146の出力信号はI/Vコンバータ148に供給される。フォトディテクタ144の出力信号はI/Vコンバータ150に供給される。I/Vコンバータ148及び150の出力電圧はそれぞれ演算ユニット152に供給される。

【0165】演算ユニット152は、例えば図2の原理に従った演算を行って、SE光の重心波長 $\lambda_{cg}$ を算出する。SE光のスペクトルには、EDFAのゲインチルトが反映されるので、このSE光の重心波長の $\lambda_{cg}$ に基づいてこれまでに例示したような種々の制御を行うことができる。

【0166】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によると、ゲインチルトの評価に代替可能なモニタリング方法及び装置の提供が可能になるという効果が生じる。

【0167】また、このモニタリング方法及び装置の光増幅器及び光通信システムへの効果的な適用が可能にな

るという効果も生じる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明のモニタリング装置の基本構成を示すブロック図である。

【図2】重心波長のモニタリングの原理説明図である。

【図3】ゲインチルトの説明図である。

【図4】ASE光の重心波長のモニタ例を示す図である。

【図5】WDM信号光の重心波長のモニタ例を示す図である。

【図6】本発明のモニタリング装置の第1実施形態を示すブロック図である。

【図7】図6の装置の動作を示すフローチャートである。

【図8】本発明のモニタリング装置の第2実施形態を示すブロック図である。

【図9】図8の装置の動作を示すフローチャートである。

【図10】本発明のモニタリング装置の第3実施形態を示すブロック図である。

【図11】図10の装置の動作を示すフローチャートである。

【図12】重み付けエレメントの第1実施形態を示す図である。

【図13】図12における重み付け特性の一例を示すグラフである。

【図14】重み付けエレメントの第2実施形態を示す図である。

【図15】図14における重み付け特性の一例を示すグラフである。

【図16】本発明の光増幅器の基本構成を示すブロック図である。

【図17】本発明の光増幅器の第1実施形態を示すブロック図である。

【図18】本発明の光増幅器が適用される光通信システムのブロック図である。

【図19】プリアンプの説明図である。

【図20】トーン成分の説明図である。

【図21】本発明の光増幅器が適用される他の光通信システムのブロック図である。

【図22】本発明の光増幅器の第2実施形態を示すブロック図である。

【図23】本発明の光増幅器の第3実施形態を示すブロック図である。

【図24】本発明の光増幅器の第4実施形態を示すブロック図である。

【符号の説明】

2 第1の検出手段

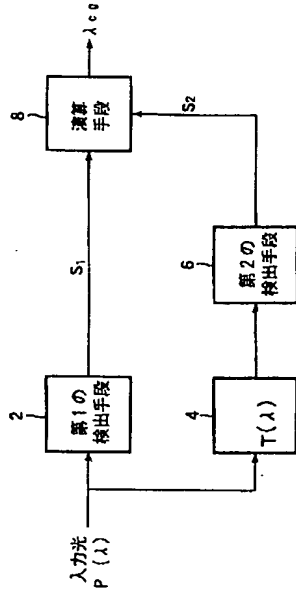
4 重み付け手段

50 6 第2の検出手段

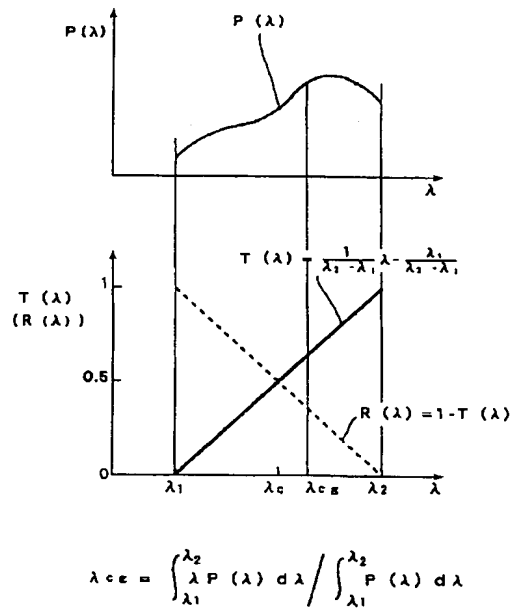
## 8 演算手段

【図1】

モニタリング装置の基本構成を示す図

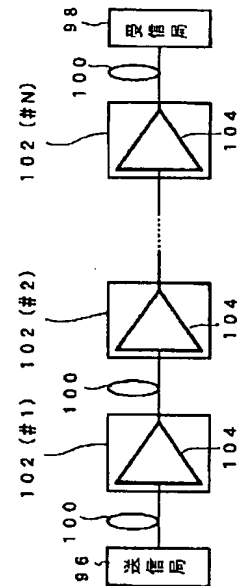


【図2】

重心波長  $\lambda_{cg}$  のモニタリングの原理説明図

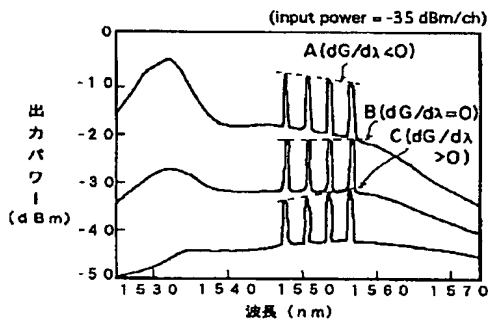
【図18】

光通信システムのブロック図



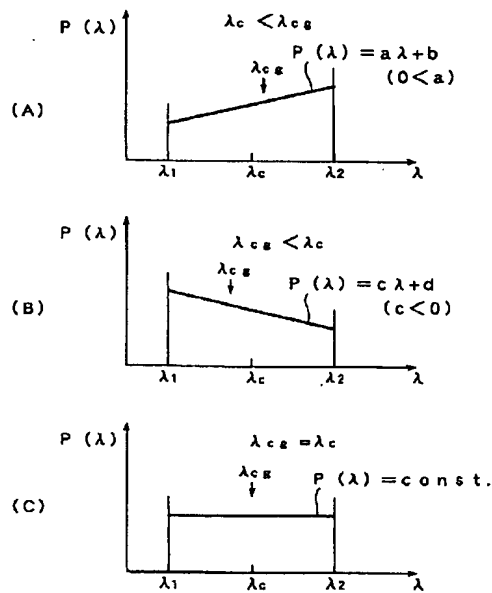
【図3】

ゲインチルトの説明図



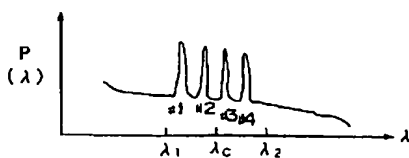
【図4】

ASE光の重心波長のモニタ例を示す図



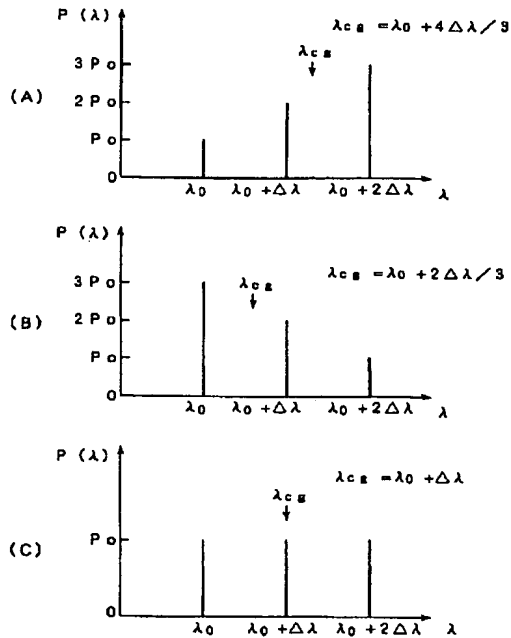
【図19】

プリエンファシスの説明図



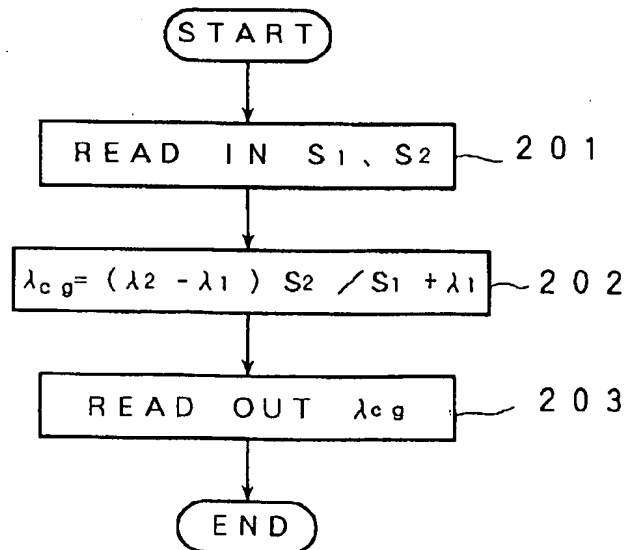
【図5】

WDM信号光の重心波長のモニタ例を示す図



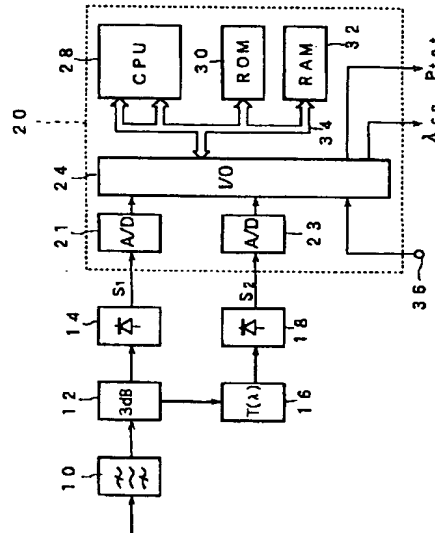
【図7】

図6の装置の動作を示すフローチャート



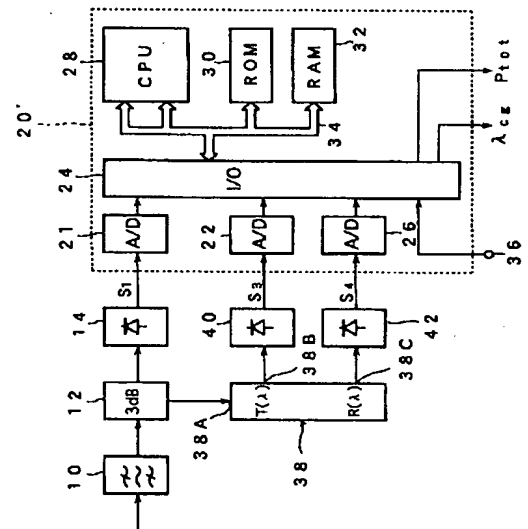
【図6】

モニタリング装置の第1実施形態ブロック図



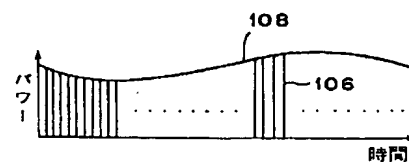
【図8】

モニタリング装置の第2実施形態ブロック図



【図20】

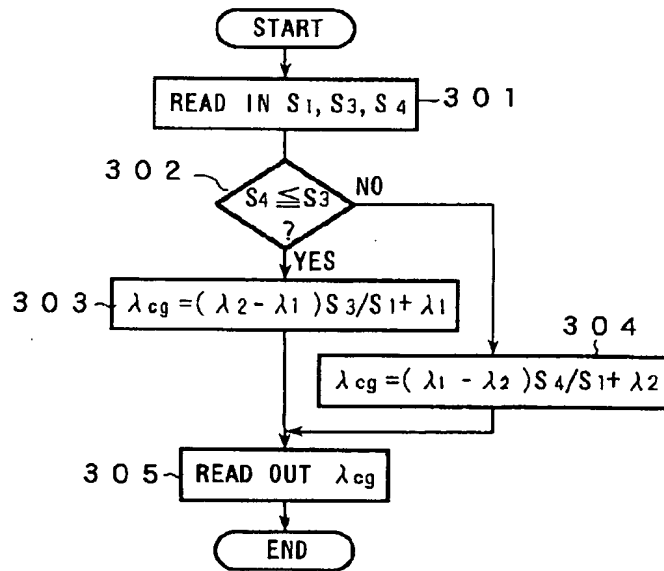
トーン成分の説明図





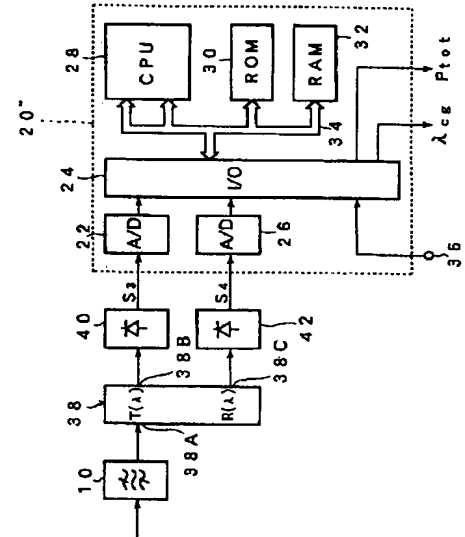
【図 9】

図 8 の装置の動作を示すフローチャート



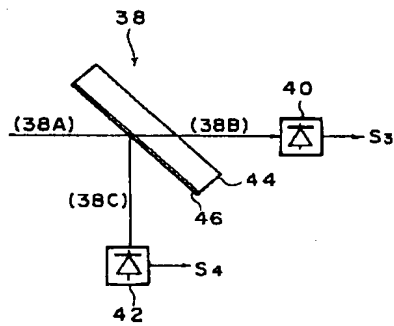
【図 10】

モニタリング装置の第 3 実施形態ブロック図



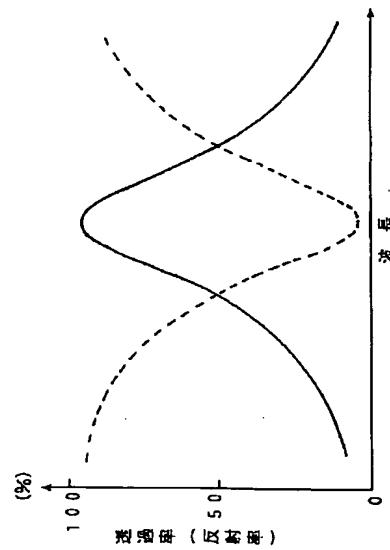
【図 12】

重み付けエレメントの第 1 実施形態を示す図



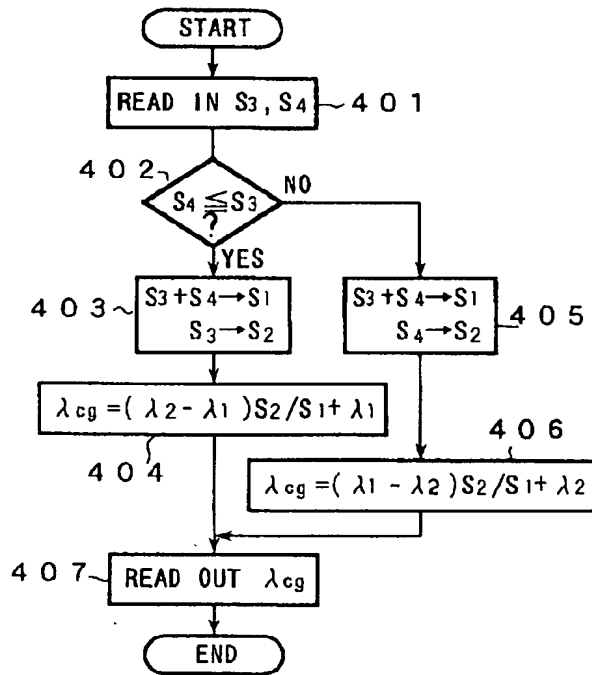
【図 13】

図 12 における重み付け特性の一例を示すグラフ



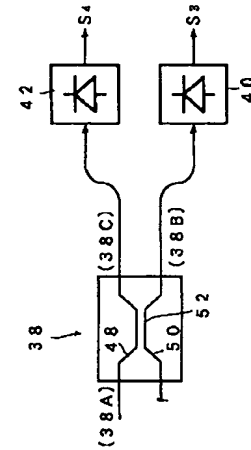
【図 11】

図 10 の装置の動作を示すフローチャート



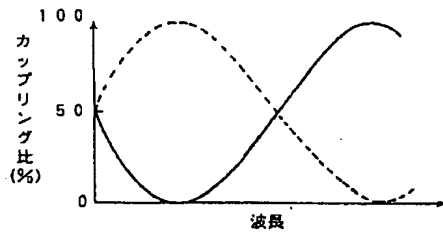
【図 14】

重み付けエレメントの第2実施形態を示す図



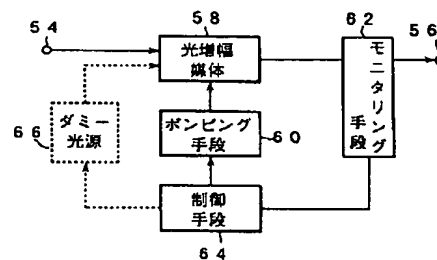
【図 15】

図 14 における重み付け特性の一例を示すグラフ



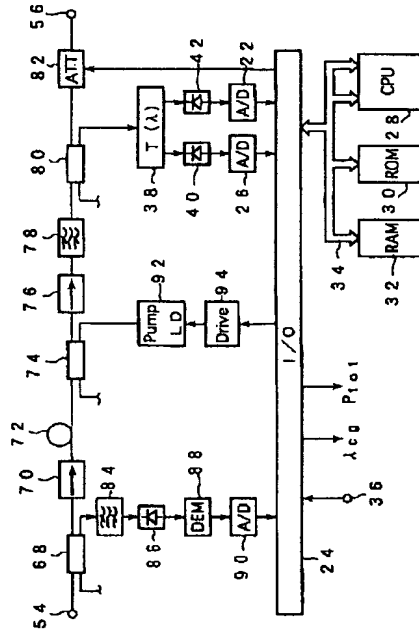
【図 16】

光増幅器の基本構成を示す図



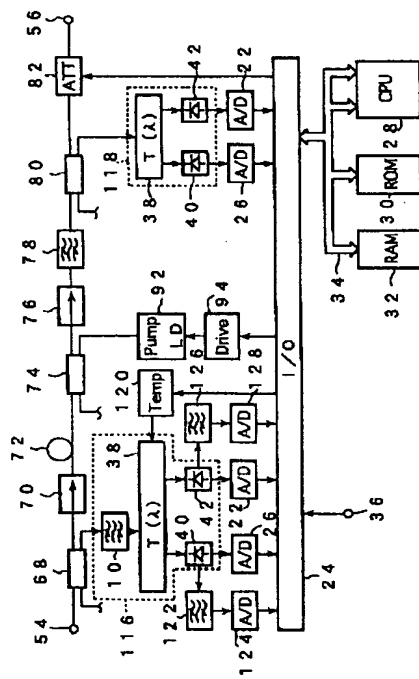
【図 17】

光増幅器の第1実施形態ブロック図



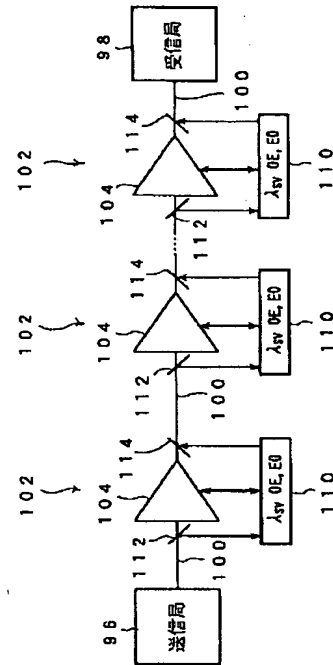
【図 22】

光増幅器の第2実施形態ブロック図



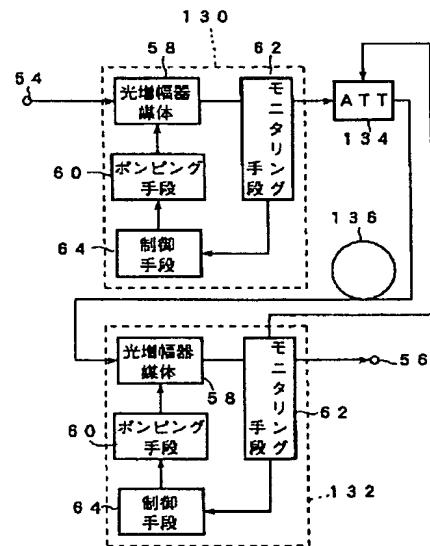
【図 21】

他の光通信システムのブロック図



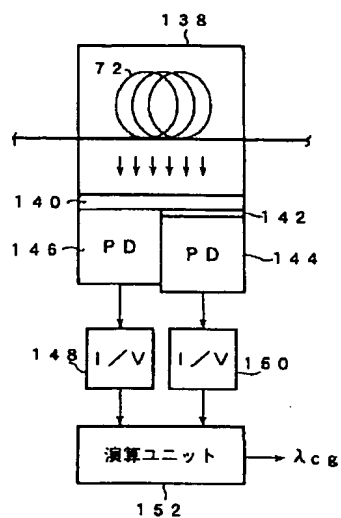
【図 23】

光増幅器の第3実施形態ブロック図



【図 24】

光増幅器の第 4 実施形態ブロック図 (主要部)



フロントページの続き

(51) Int. Cl.<sup>6</sup>

H04J 14/00

14/02

識別記号

庁内整理番号

FI

技術表示箇所